

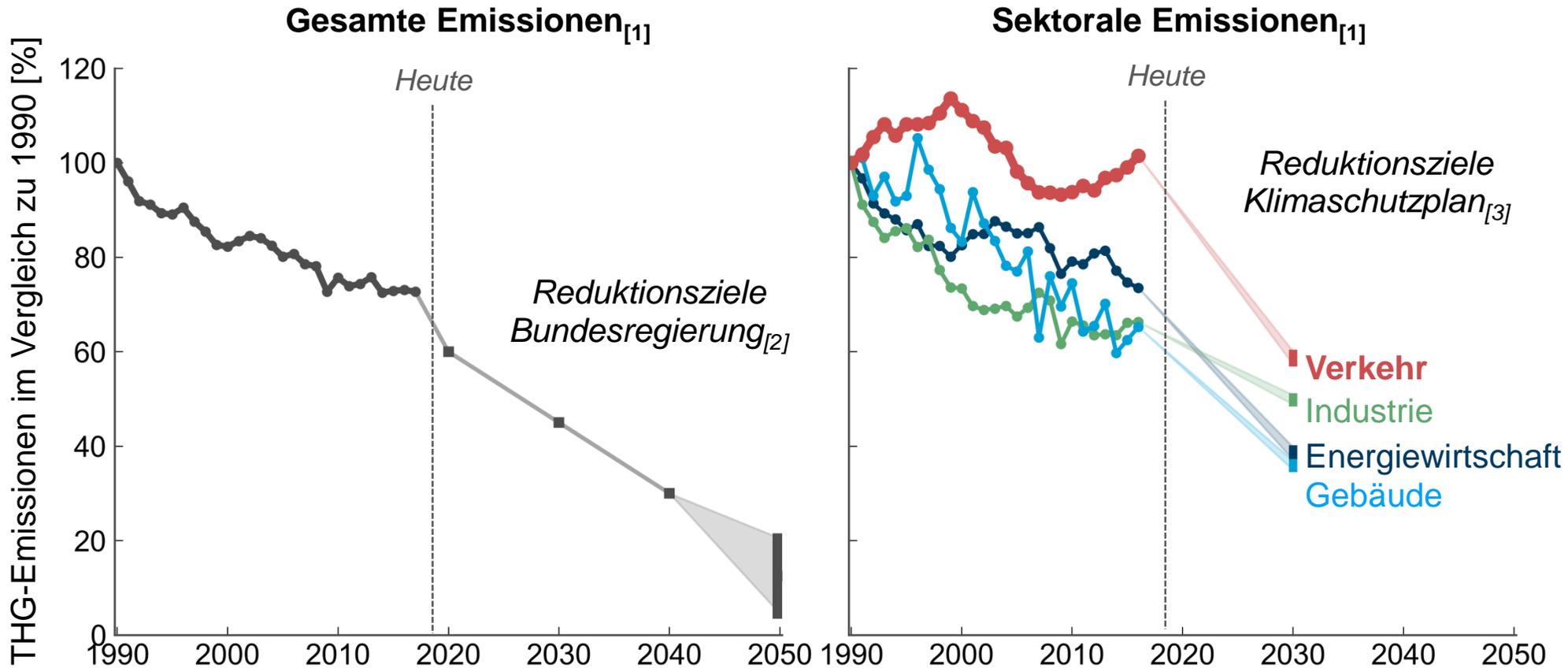
Infrastruktur-Analyse zur Sektorenkopplung Strom und Verkehr

MARTIN ROBINIUS, JOCHEN LINSSEN, THOMAS GRUBE, LEANDER KOTZUR,
DETLEF STOLTEN

11. NIEDERSÄCHSISCHE ENERGIE-TAGE
21.11.2018, HANNOVER

IEK-3: Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik

Treibhausgas(THG)-Emissionen in Deutschland seit 1990



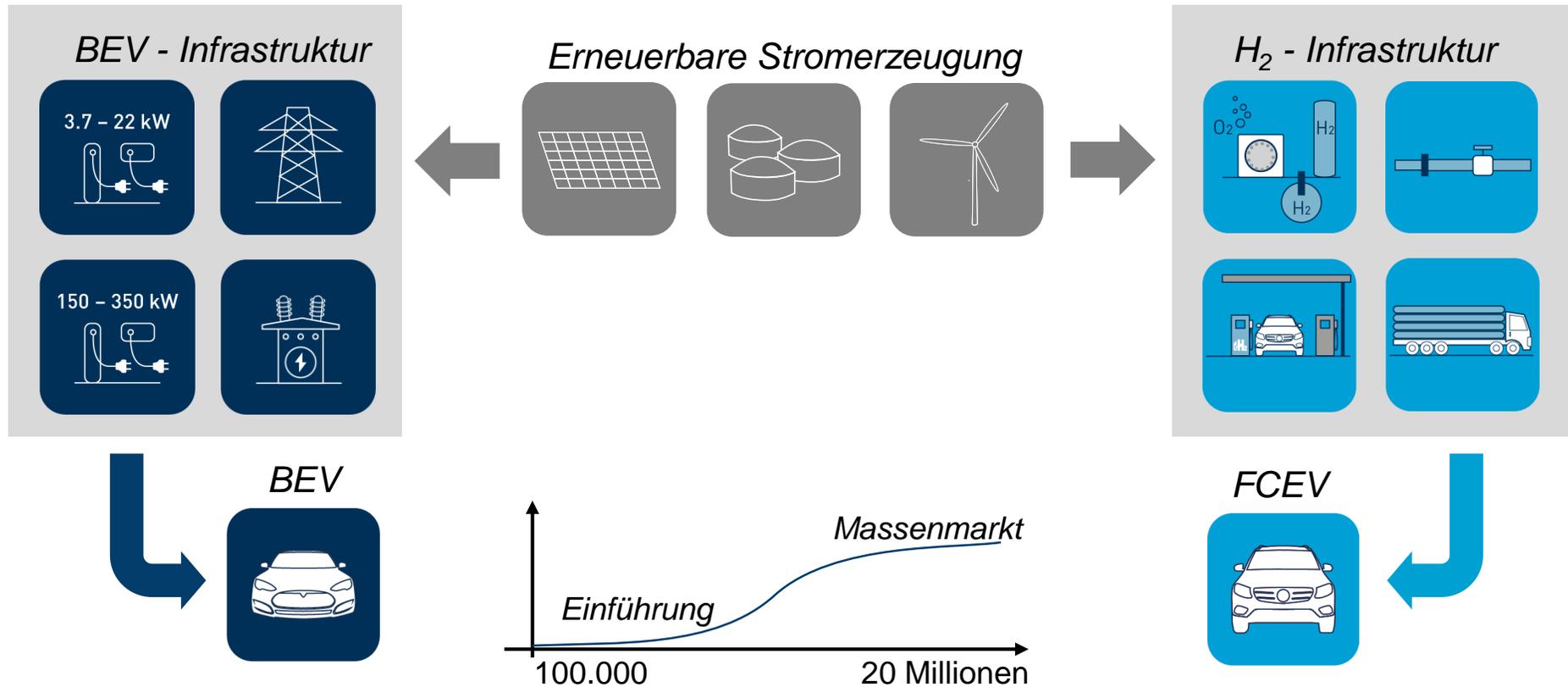
- ▶ Grundlegender Strukturwandel zur Erreichung der Reduktionsziele notwendig
- ▶ Verkehrssektor weist kumuliert seit 1990 keine THG-Reduktion auf

[1] BMWi, *Zahlen und Fakten Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung*. 2018: Berlin.

[2] BRD, *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. 2010: Berlin.

[3] BMU, *Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. 2016: Berlin.

Batterie-Fahrzeuge (BEV) & Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV) sind Schlüsselemente für einen THG-neutralen Verkehr



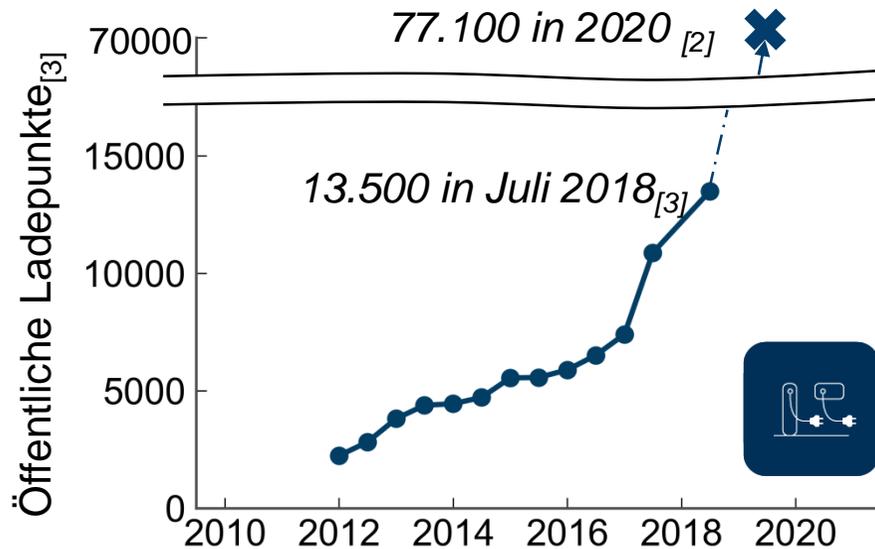
Wie hoch sind die Investitionen, Kosten, Effizienzen und Emissionen für die jeweiligen Infrastrukturen?

Status quo der Fahrzeuge und Infrastrukturen in Deutschland

Batterie-Fahrzeuge (BEV)



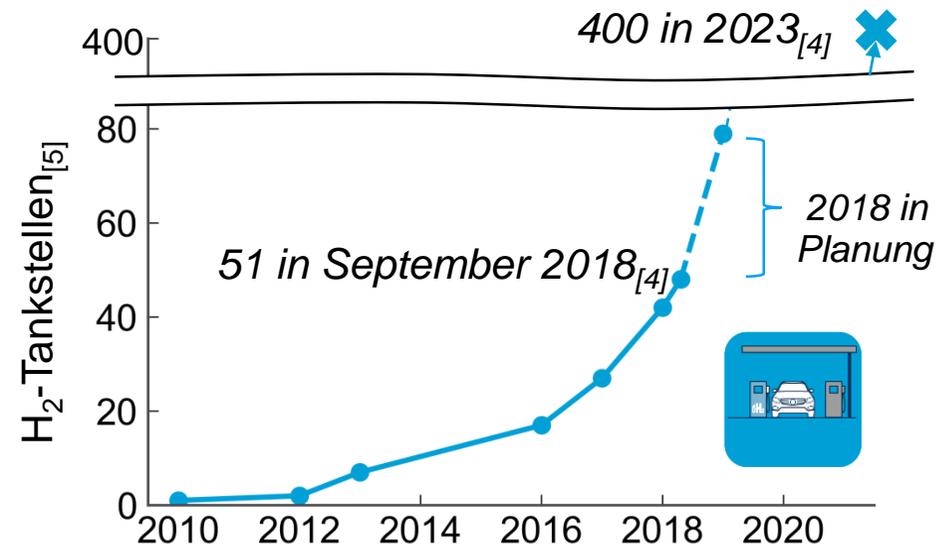
44.419 Plug-In Hybride und
53.861 BEVs (1.1.2018)^[1]



Brennstoffzellen-Fahrzeuge (FCEV)



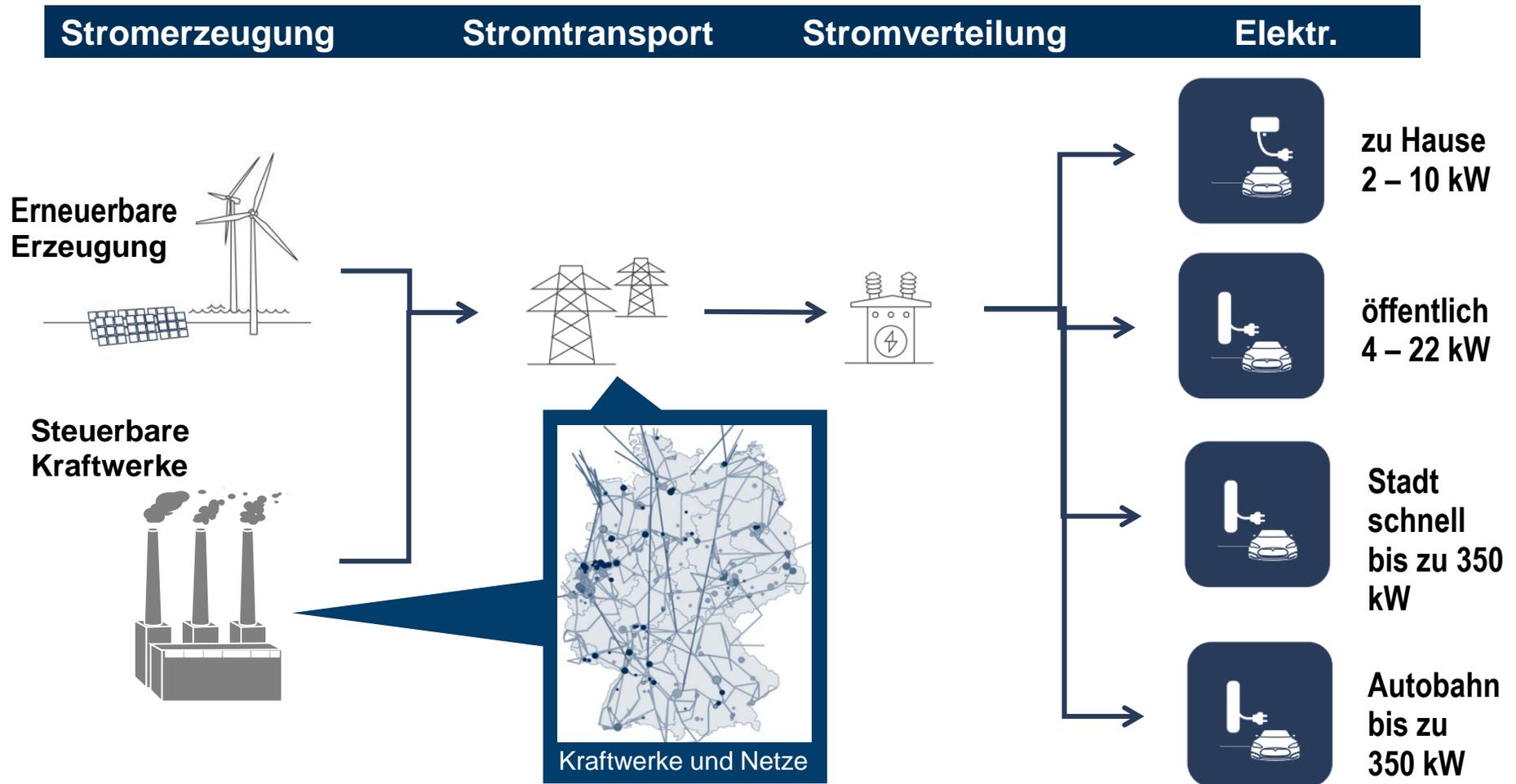
325 PKWs, 15 Busse, 2 LKW,
2 Zugmaschinen (1.1.2018)^[1]



Versorgungsinfrastrukturen sind marktreif und notwendige Technologien eingeführt

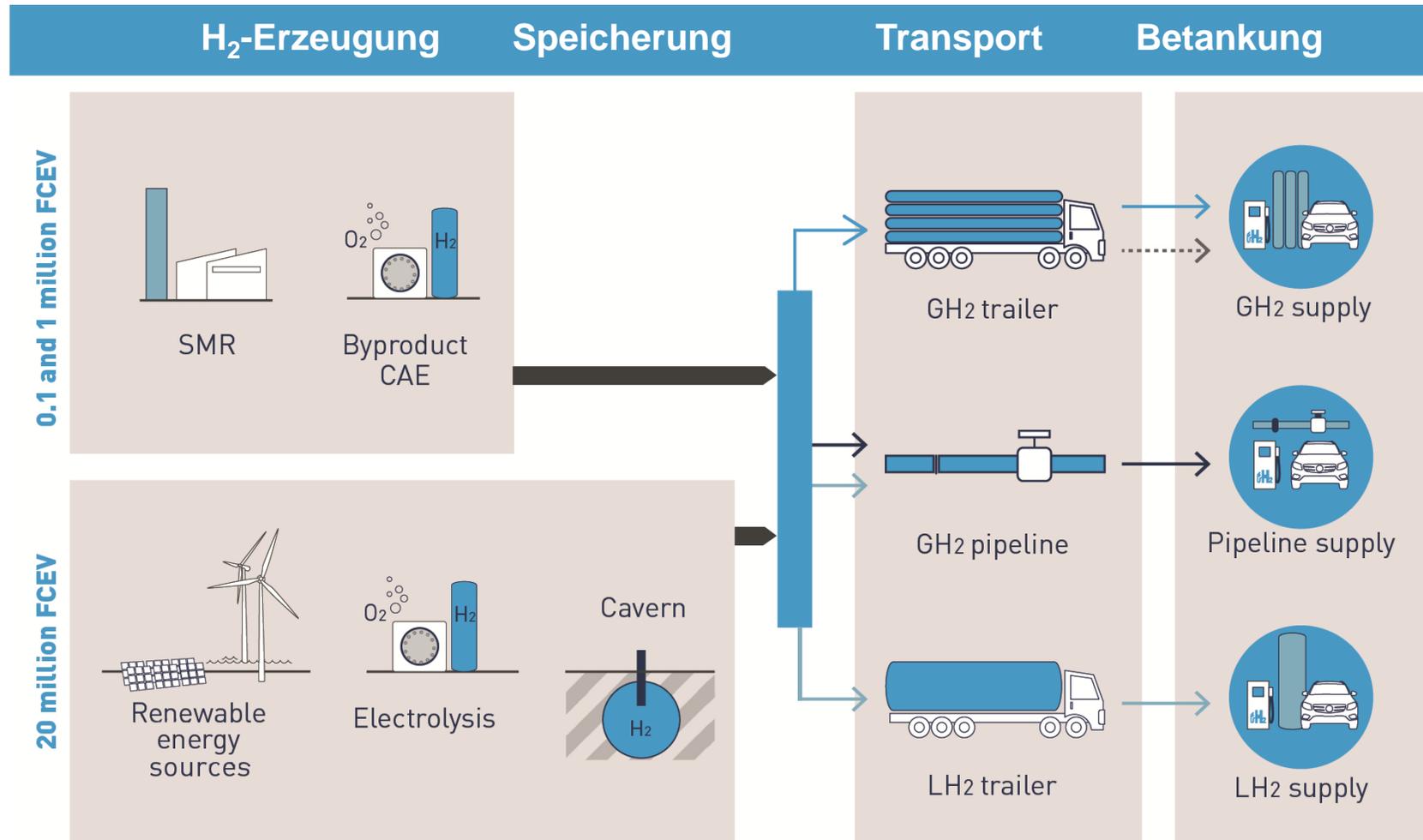
[1] KBA. *Bestand am 1. Januar 2018 nach Motorisierung*. 2018 (FCEV Auf Anfrage) [2] Nationale Plattform Elektromobilität: *Wegweiser Elektromobilität*. 2016. [3] BDEW, *Erhebung Ladeinfrastruktur*. 2017: Berlin. [4] H2 MOBILITY: *H2-Stations*. 2018 [5] HyARC, *International Hydrogen Fueling Stations*. 2018.

Komponenten der elektrische Ladeinfrastruktur



Räumlich- und zeitlich hoch aufgelöste Modelle

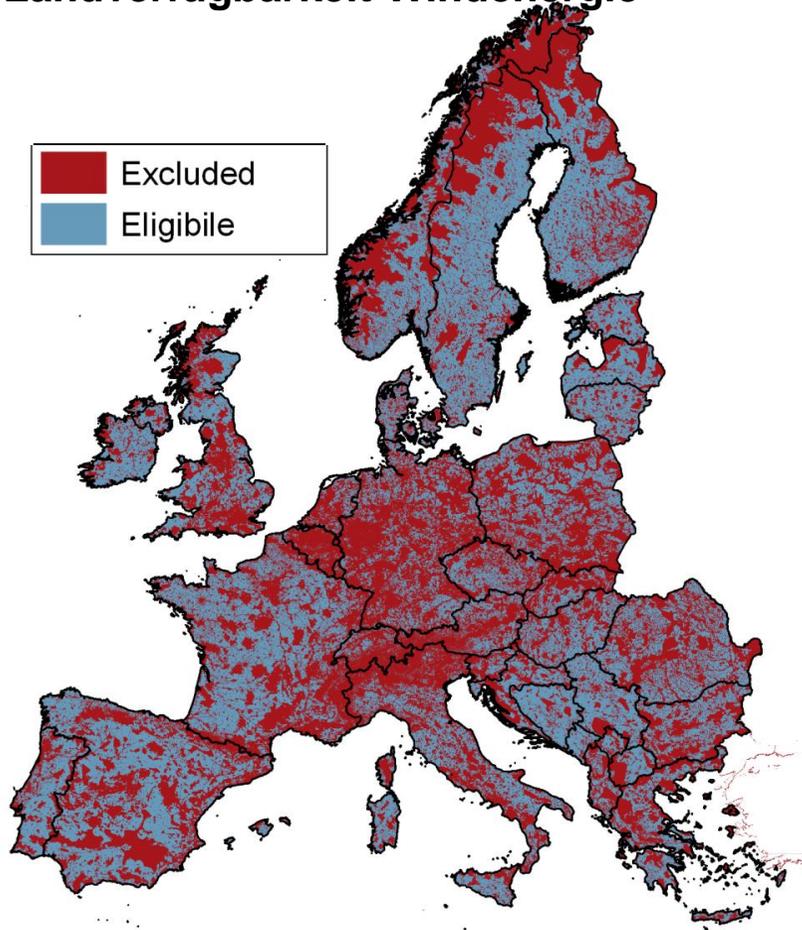
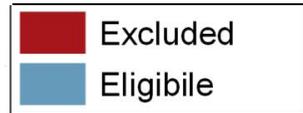
Komponenten der H₂-Infrastruktur



Räumlich- und zeitlich hoch aufgelöste Modelle

Modellwelt am Beispiel Windenergie an Land

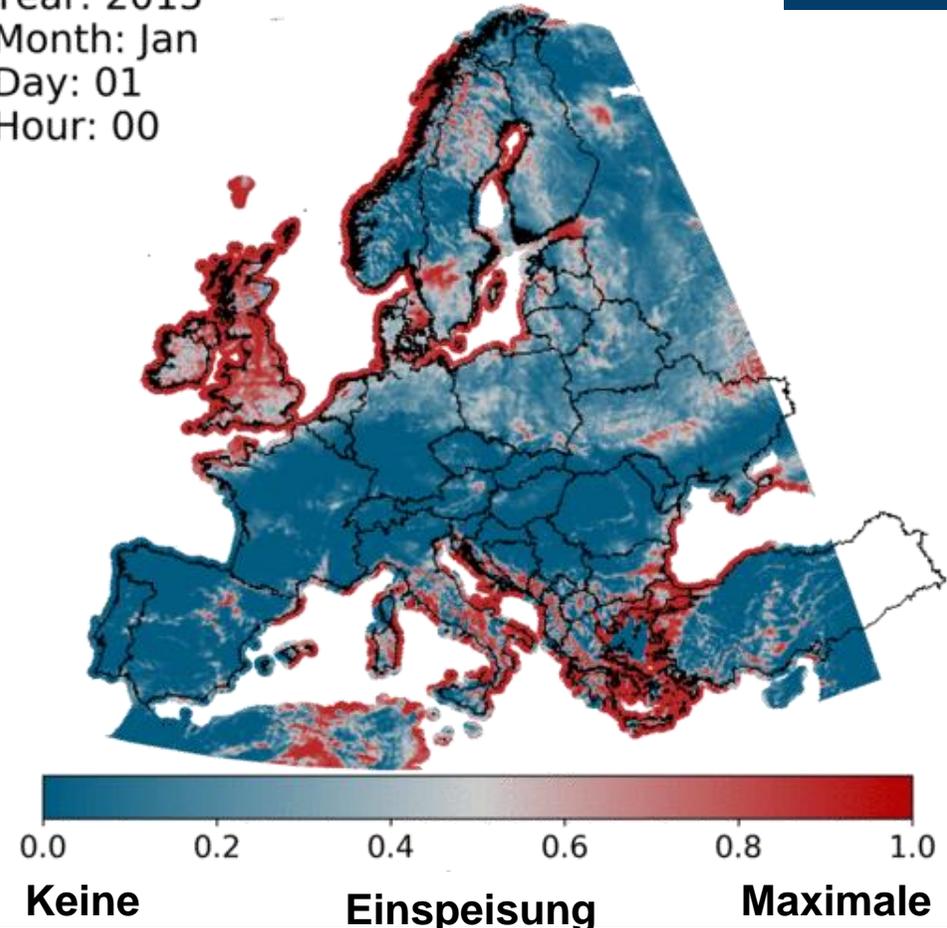
Landverfügbarkeit Windenergie



&

Windeinspeisung in Europa

Year: 2015
Month: Jan
Day: 01
Hour: 00



Räumlich- und zeitlich hoch aufgelöste Modelle aufgrund erneuerbarer Energien notwendig

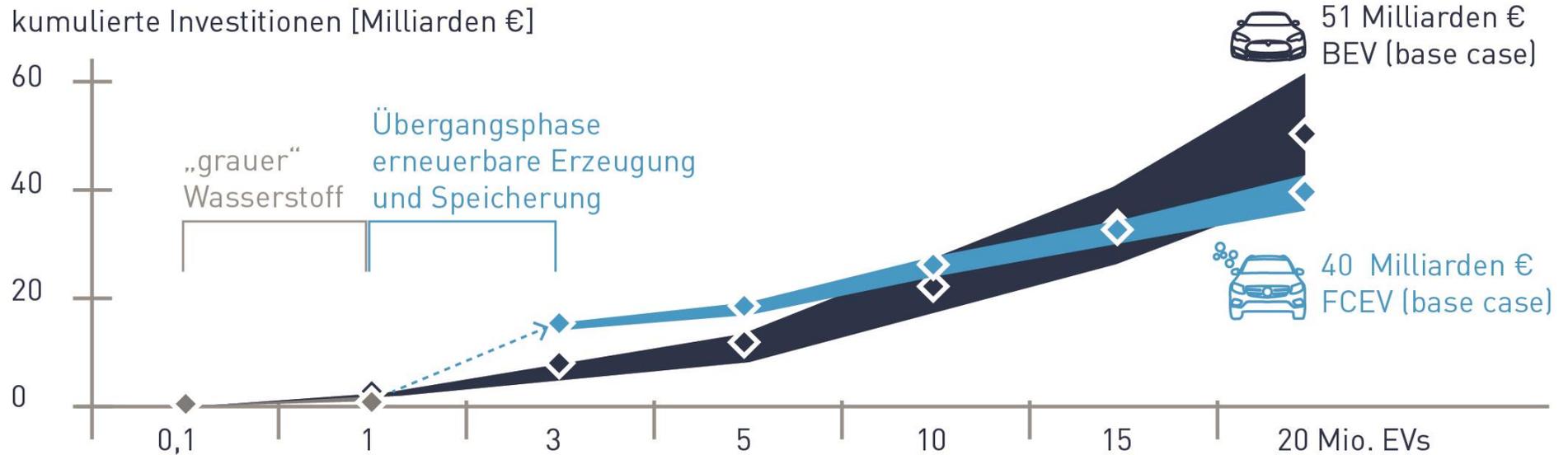
[1] Robinius, M. et al.: Linking the Power and Transport Sectors—Part 2: Modelling a Sector Coupling Scenario for Germany. *Energies*, 2017. 10(7): p. 957. [2] Ryberg, D., M. Robinius, and D. Stolten, Evaluating Land Eligibility Constraints of Renewable Energy Sources in Europe. *Energies*, 2018. 11(5): p. 1246

Ausgewählte Ergebnisse und Infrastruktur-Kennwerte

		Einführung				Massenmarkt				
		0,1 Millionen		3 Millionen		10 Millionen		20 Millionen		
Kabellänge				1.800 km		28.000 km		183.000 km		
Ortsnetz-Trafo				6.100		55.000		187.000		
Normal-Lader		100.000 @ 3.7 kW		2,8 Millionen		6,5 Millionen		11 Mill. @ 22 kW		
Schnell-Lader		6.000 @ 150 kW		81.000		175.000		245.000 @ 350 kW		
Speicher				2 TWh		5 TWh		10 TWh		
Elektrolyse				3 GW		10 GW		19 GW		
Lkw		42		730		1.500		3.000		
Pipeline				12.000 km		12.000 km		12.000 km		
Tankstellen		400		1.500		3.800		7.000		

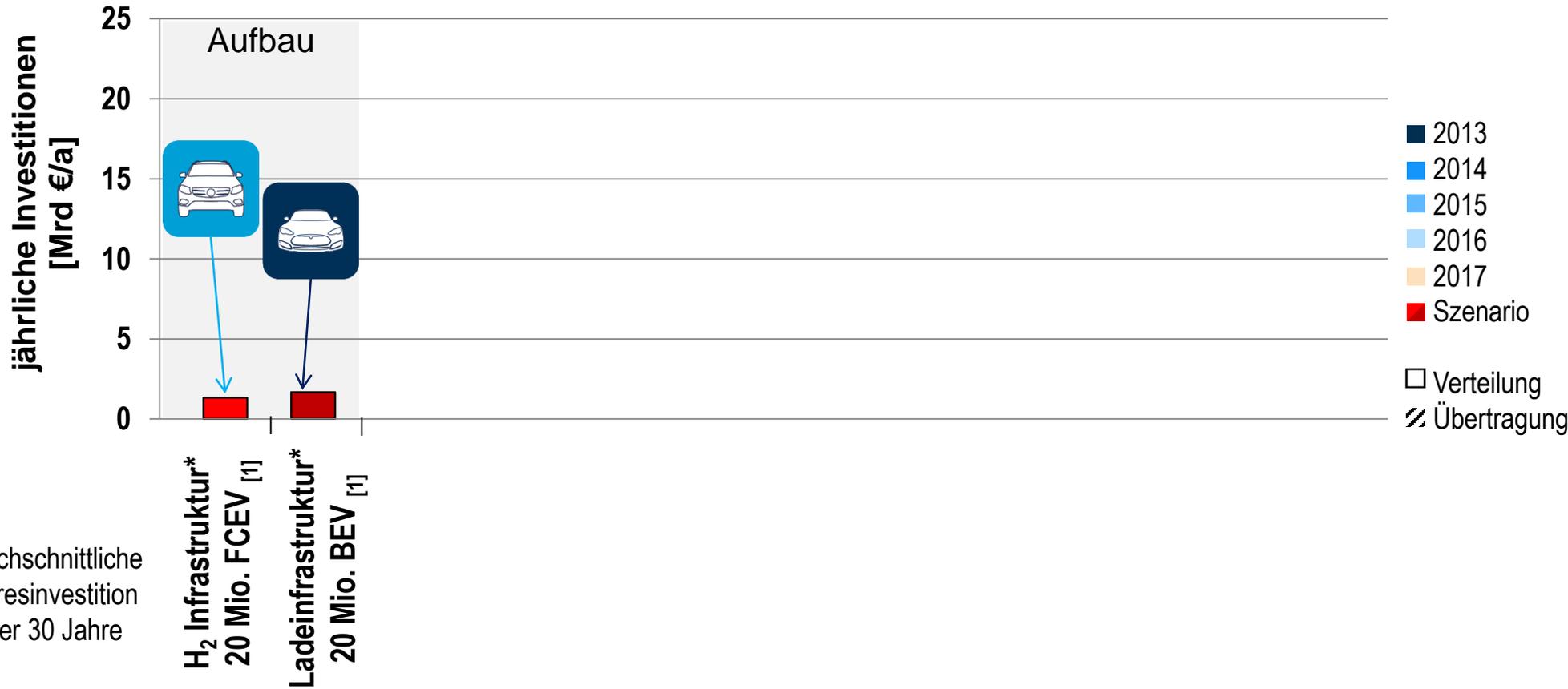
- ▶ BEV profitieren in der Einführungsphase von vorhandener Infrastruktur
- ▶ Wasserstoff-Infrastruktur mit saisonaler Speicherung der erneuerbaren Energien
- ▶ Bereits ab 3 Mill. FCEV Wasserstoff-Transmissionspipeline vorteilhaft

Vergleich der Infrastruktur-Investitionen



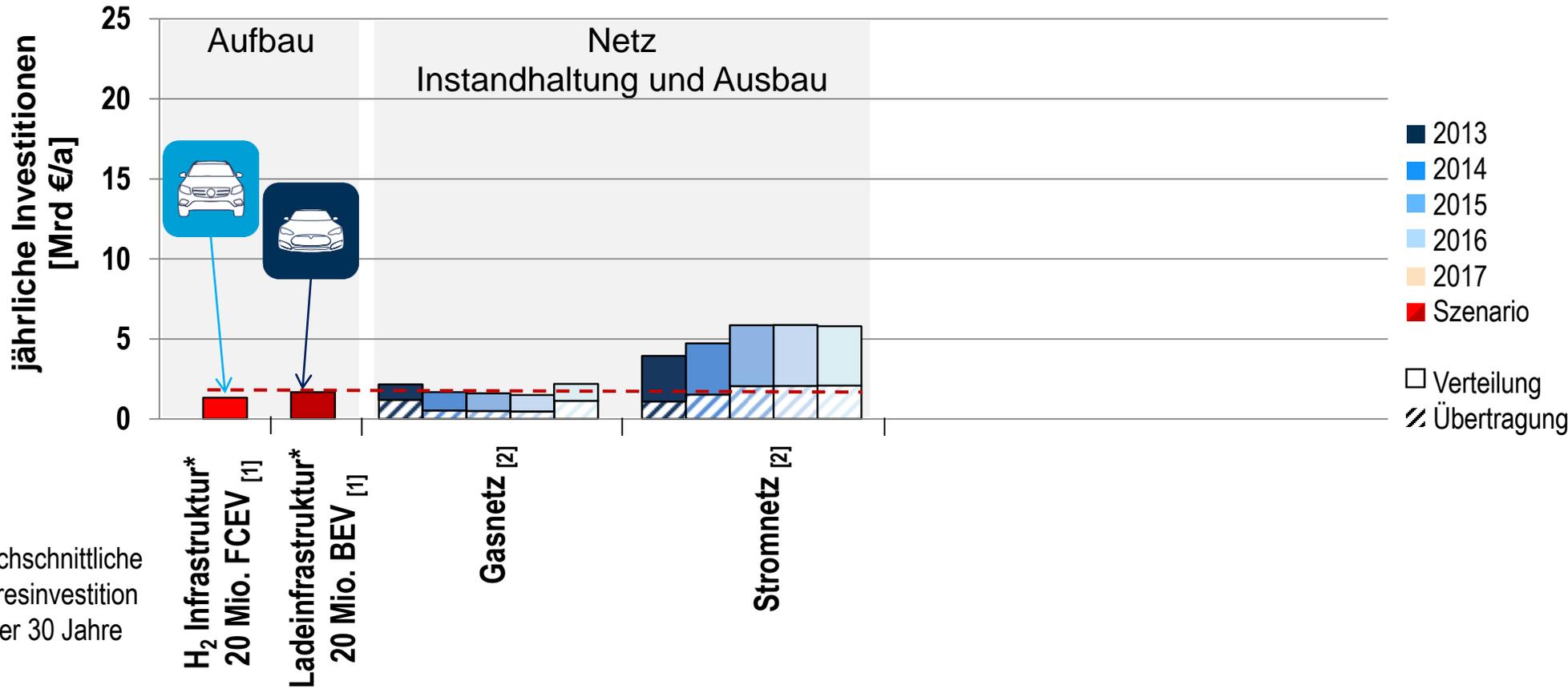
- ▶ Ähnliche kumulierte Investitionen in Einführungs- und Massenmarktphase
- ▶ Zukünftiges Ladeverhalten unklar – Unsicherheit bei Investitionen in Ladeinfrastruktur
- ▶ H₂-Infrastruktur mit starken Skalierungseffekte

Vergleich jährliche Investitionen Energieinfrastrukturen



[1] Robinius, M. et al.: Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. 2018 [2] BNetzA: Monitoringbericht 2017. [3] BDEW: Investitionen der deutschen Stromwirtschaft. 2018 [4] BMWi: Erneuerbare Energien in Zahlen. 2017

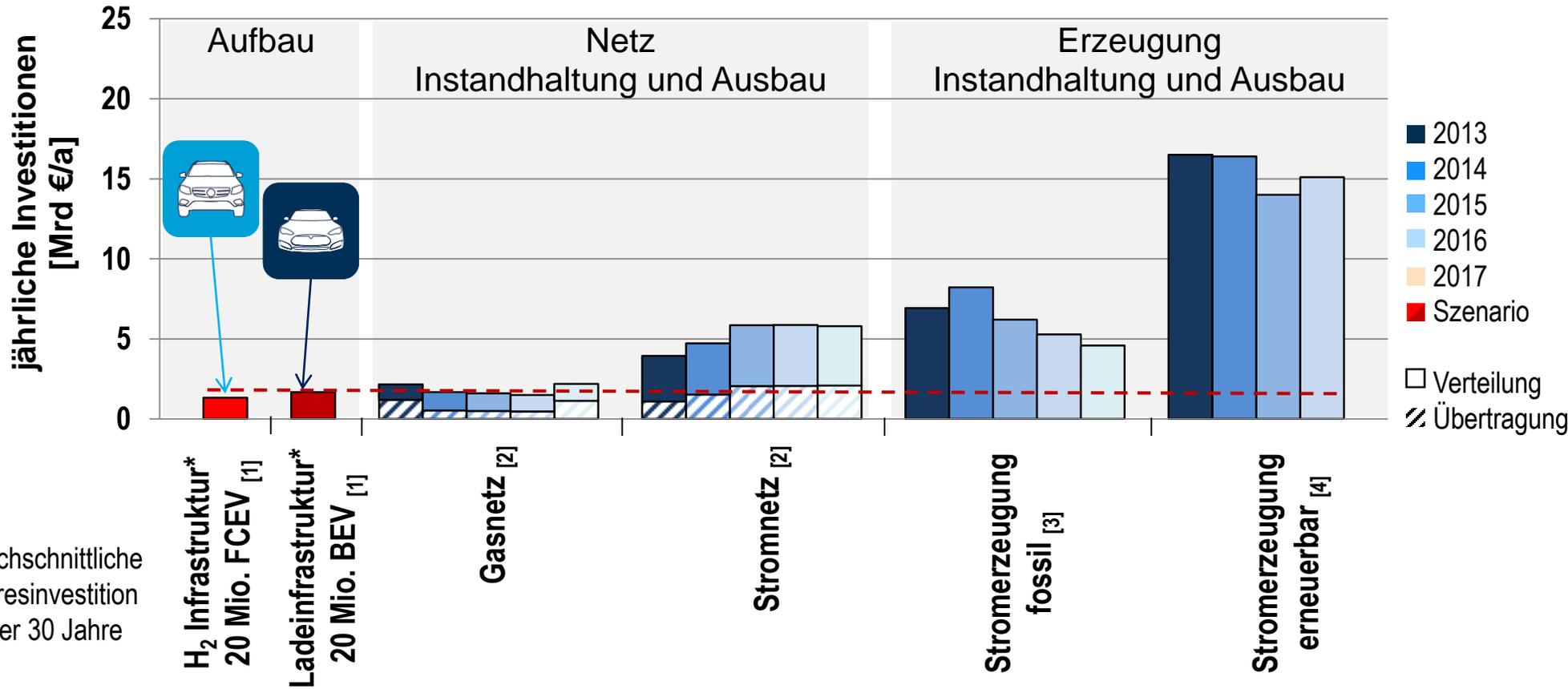
Vergleich jährliche Investitionen Energieinfrastrukturen



*durchschnittliche Jahresinvestition über 30 Jahre

[1] Robinius, M. et al.: Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. 2018 [2] BNetzA: Monitoringbericht 2017. [3] BDEW: Investitionen der deutschen Stromwirtschaft. 2018 [4] BMWi: Erneuerbare Energien in Zahlen. 2017

Vergleich jährliche Investitionen Energieinfrastrukturen



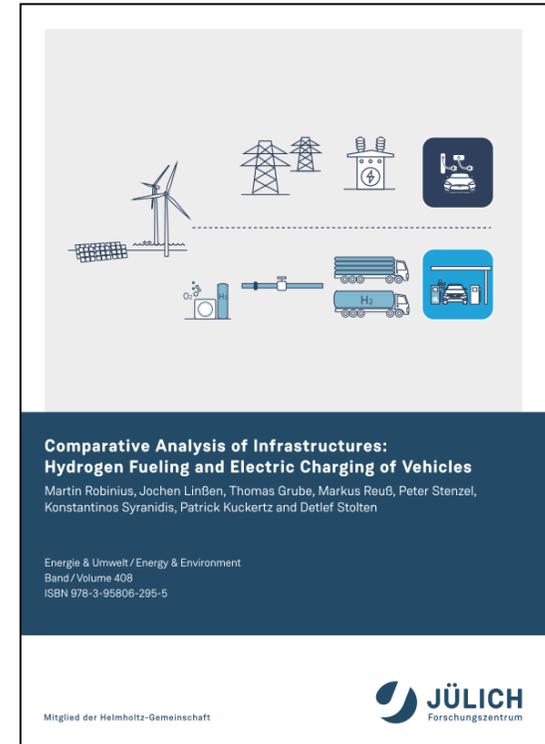
H₂- und Lade-Infrastrukturen: Jährliche Aufbau-Investitionen gering im Vergleich zu Instandhaltungs- und Ausbauinvestitionen von bestehenden Energieinfrastrukturen

[1] Robinius, M. et al.: Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles. 2018 [2] BNetzA: Monitoringbericht 2017. [3] BDEW: Investitionen der deutschen Stromwirtschaft. 2018 [4] BMWi: Erneuerbare Energien in Zahlen. 2017

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Bericht verfügbar unter:

<http://hdl.handle.net/2128/16709>



Wissenschaftler-Team:

Martin Robinius, Jochen Linßen, Thomas Grube, Markus Reuß, Peter Stenzel, Konstantinos Syranidis, Patrick Kuckertz und Detlef Stolten

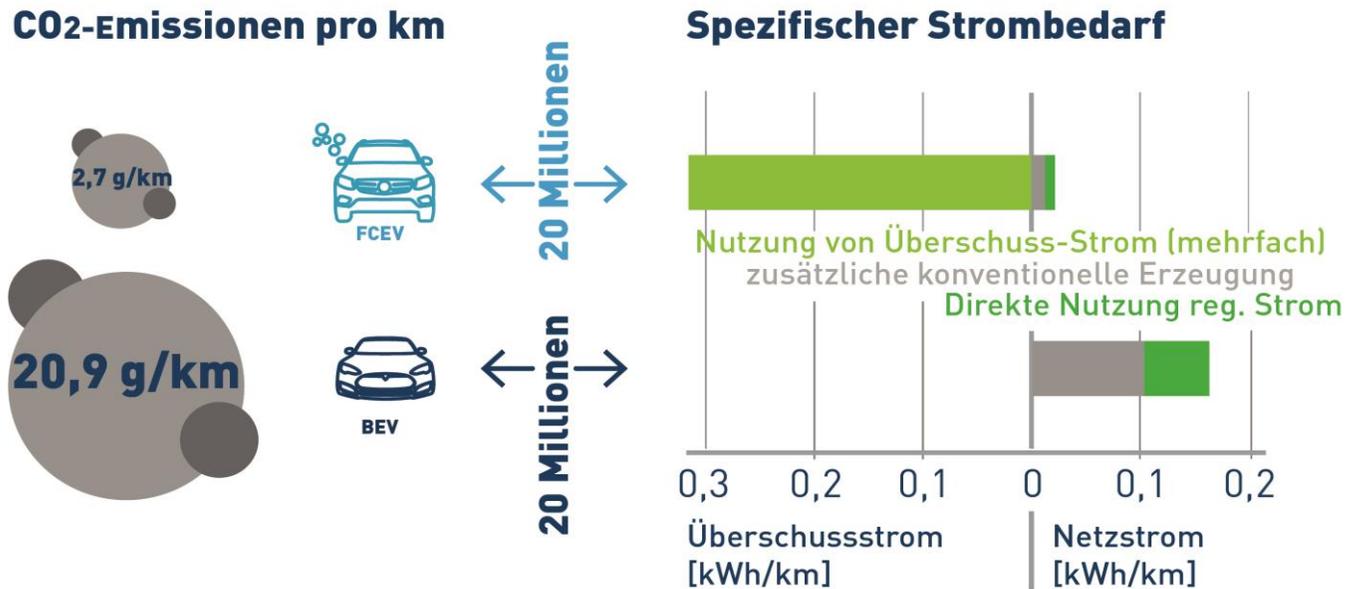
Batterie und Brennstoffzelle

Backup

Kernaussagen

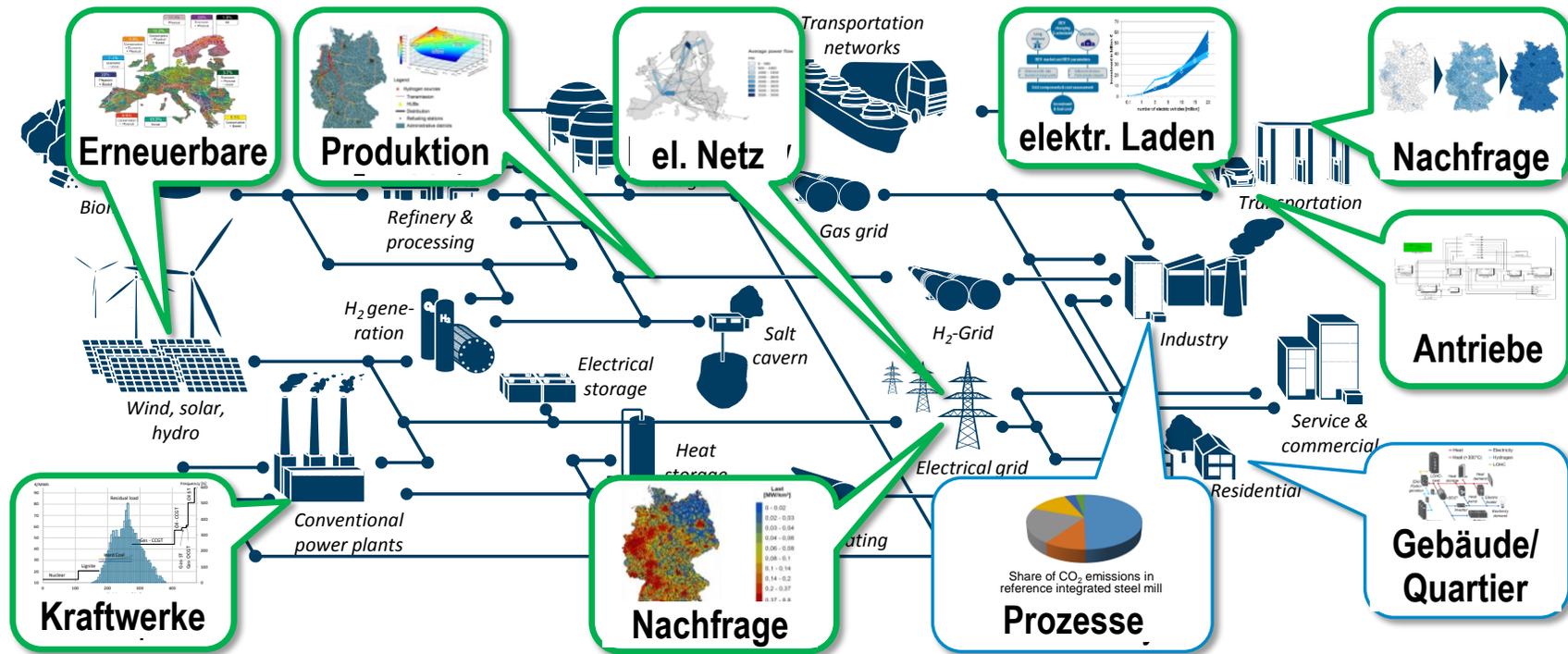
- Batterieelektrische Fahrzeuge profitieren in der Einführungsphase von der vorhandenen Infrastruktur
- Wasserstoffinfrastruktur mit saisonaler Speicherung der erneuerbaren Energien
- Bereits ab 3 Mill. Brennstoffzellenfahrzeugen ist eine Wasserstofftransmissionspipeline vorteilhaft
- Ähnliche kumulierte Investitionen in die Infrastrukturen in Einführungs- und Massenmarktphase
- Zukünftiges Ladeverhalten unklar – Investitionen in Ladeinfrastruktur unsicher
- Wasserstoff-Infrastruktur mit starken Skalierungseffekte
- Wasserstoff- und Lade-Infrastrukturen: Jährliche Aufbau-Investitionen gering im Vergleich zu Instandhaltungs- und Ausbauinvestitionen von bestehenden Energieinfrastrukturen

CO₂ Emissionen und Strombedarf



- Effizienz der Ladeinfrastruktur ist deutlich höher; jedoch ist die Flexibilität und Steuerbarkeit der Nachfrage geringer
- Wasserstoff-Infrastruktur mit saisonaler Speicherung und hoher Nachfrage-Flexibilität
- Geringe CO₂ Emissionen für beide Optionen mit Vorteilen beim Wasserstoff (ausschließliche Nutzung von erneuerbarem Strom für die Erzeugung); deutlich unter dem Zielwert 2020 von 95 g_{CO₂}/km

Modelle zur Abbildung von Infrastrukturen und Techniken

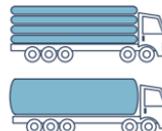
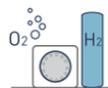


Modellanwendung

Erneuerbare Erzeugung



elektrisches Laden



Betankung Wasserstoff

Analyse bestehender Studien

▪ Auswahlkriterien für Infrastrukturstudien

- Schwerpunkt-Analyse für Deutschland und quantitative Ergebnisse; wichtige Kennwerte: Anzahl der Wasserstoff-Tankstellen und Ladepunkte, Gesamtinvestitionen für den Infrastrukturaufbau
- Gesamtzahl der untersuchten, veröffentlichten Studien: 79
- Davon 25 Studien ausgewählt (12 Wasserstoff und 13 elektrisches Laden)

▪ Erkenntnisse aus der Studienanalyse

- Meistens intransparente Annahmen zu Kosten und technischen Kennwerten, teilweise nur zusammenfassende Ergebnisse
- Bezüglich Wasserstoff: Fehlende Informationen zu wichtigen Infrastrukturkomponenten, z.B. Länge der benötigten Wasserstoff-Pipeline oder Anzahl der Verteiler-Lkw, keine konsistente Auswertung der Studien möglich
- Bezüglich elektrischer Ladeinfrastruktur: keine Studien für hohe Marktdurchdringungen von Batterie-elektrischen Fahrzeugen, fehlende Aussagen zum Stromnetzausbau und zum Bedarf an Schnell-Ladepunkten

Vorgehensweise

Literatur-Analyse zu bestehenden
Infrastruktur-Studien



Detaillierte Szenario-Analyse des
Infrastrukturbedarfs für
Deutschland in Zukunft



Szenario mit einheitlichen
Rahmenbedingungen und
Marktdurchdringungen

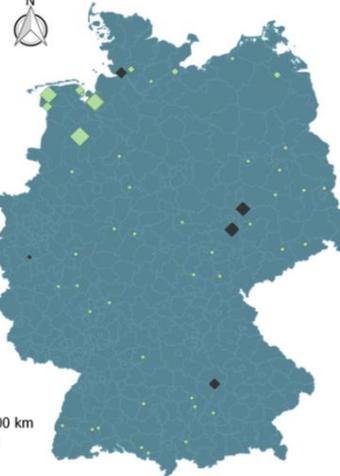


Räumlich und zeitlich auflösende
Modelle für Erzeugung, Umwand-
lung Transport und Verteilung

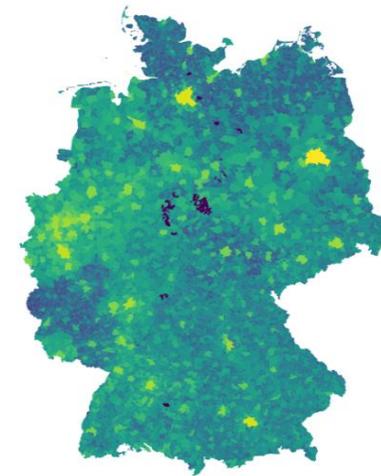


Analyse der Investitionen, Kosten
Effizienzen und Emissionen

Wasserstoff-Erzeugung



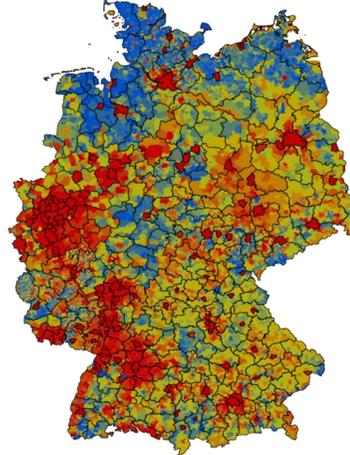
Elektrofahrzeug-Durchdringung



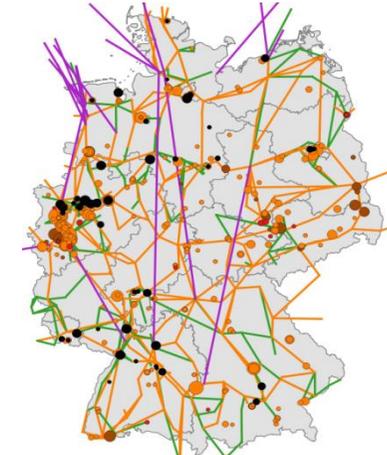
Anzahl Pkw			in Millionen	0,1	1	3	5	10	20
------------	--	--	--------------	-----	---	---	---	----	----

Unterstellte Marktdurchdringung	Einführung	Massenmarkt
---------------------------------	-------------------	--------------------

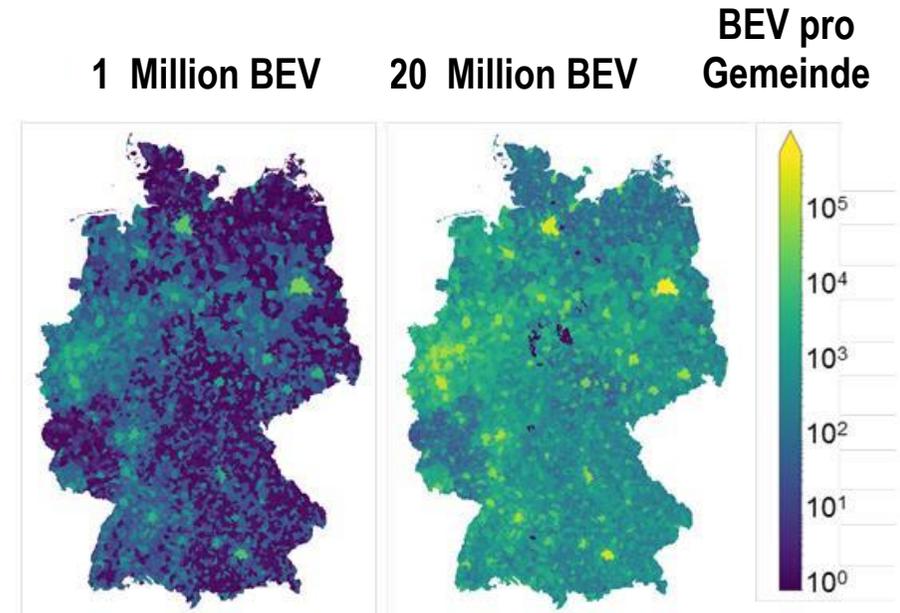
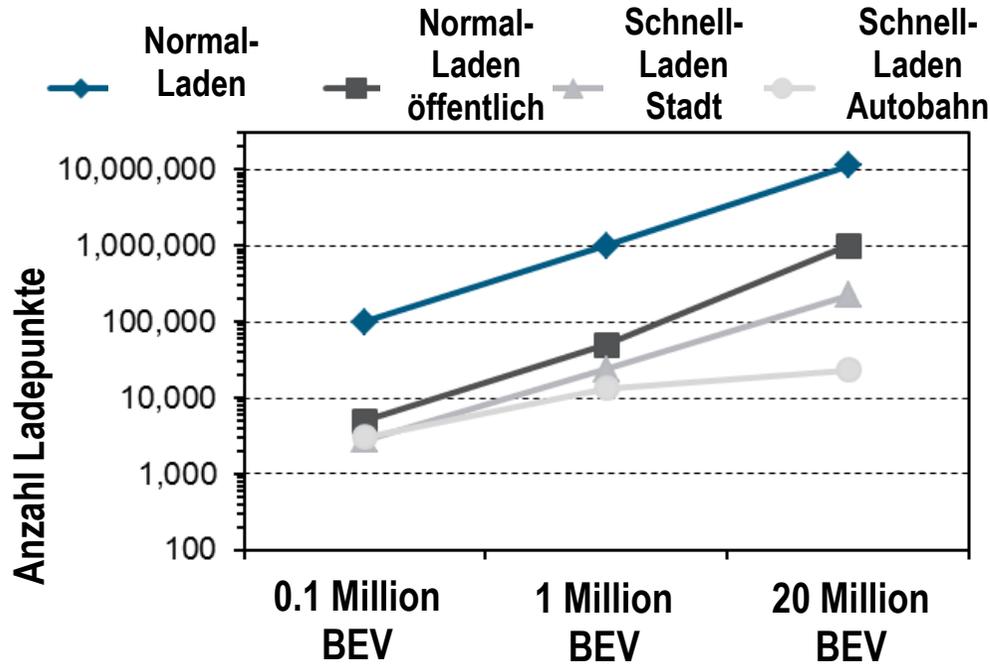
Erneuerbare Stromerzeugung



Kraftwerke und Netze



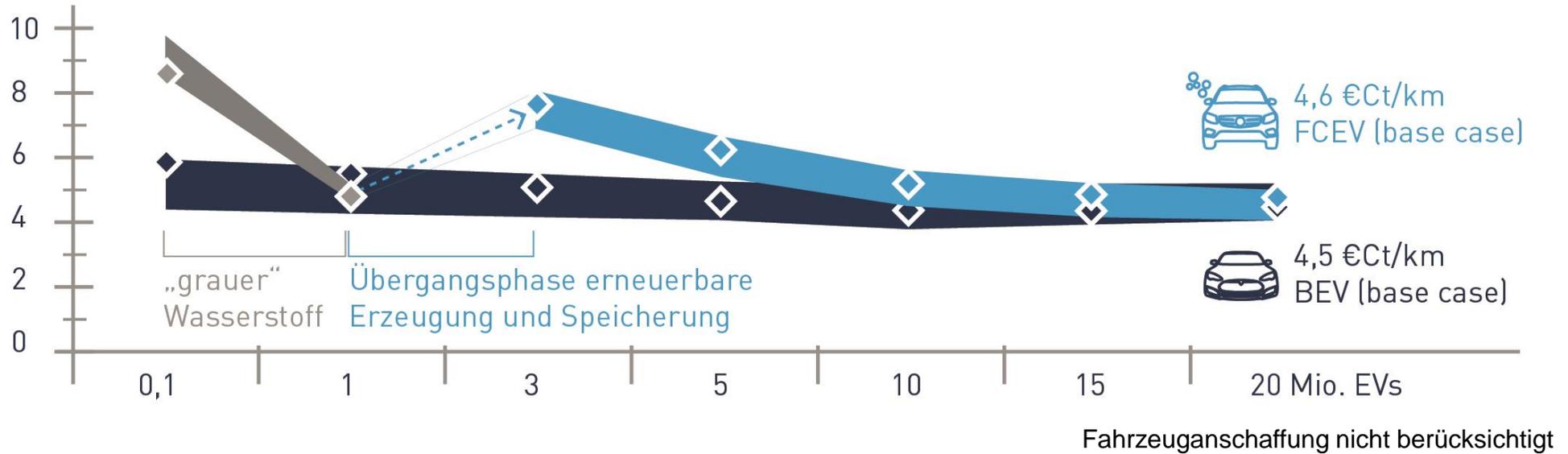
Anzahl benötigter Ladestellen für unterschiedliche Marktdurchdringungen



- Anzahl der Übernacht-Ladepunkte (Normal-Laden privat/ öffentlich) steigt mit höherem Bestand weiter an aber weniger stark:
 - bis zu einer Million Batterie-elektrische Pkw: eine Übernacht-Ladestelle für jeweils einen Pkw
 - höhere Anzahl an Batterie-elektrischen Pkw: eine Übernacht-Ladestelle für zwei Pkw, Ladung teilweise an Schnell-Ladepunkten
- Bedarf an Schnell-Ladepunkten steigt wegen steigender Reichweite der Fahrzeuge und resultierendem häufigerem Nachladen

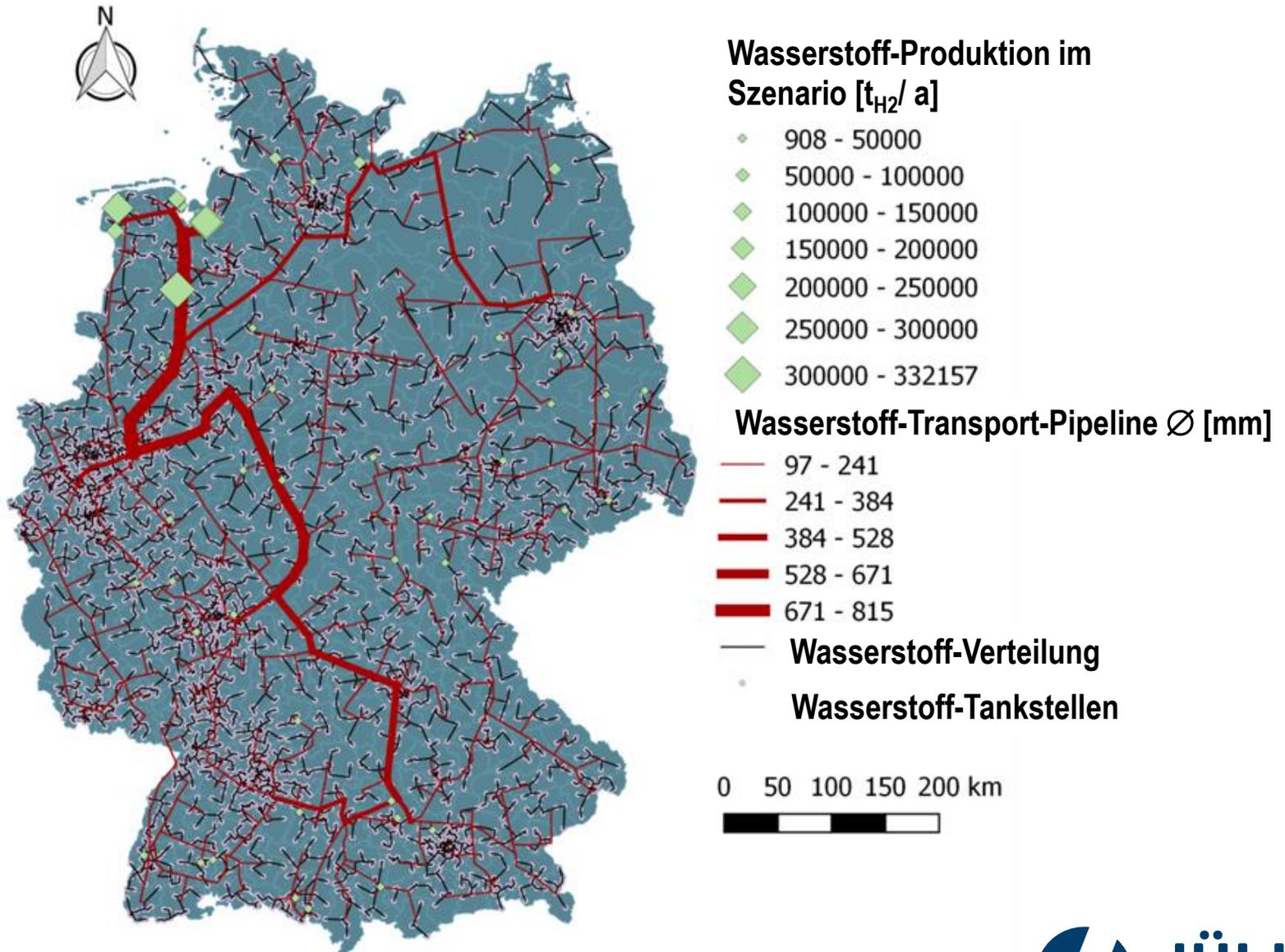
Vergleich der resultierenden Mobilitätskosten

spezifische Mobilitätskosten [€Ct/km]



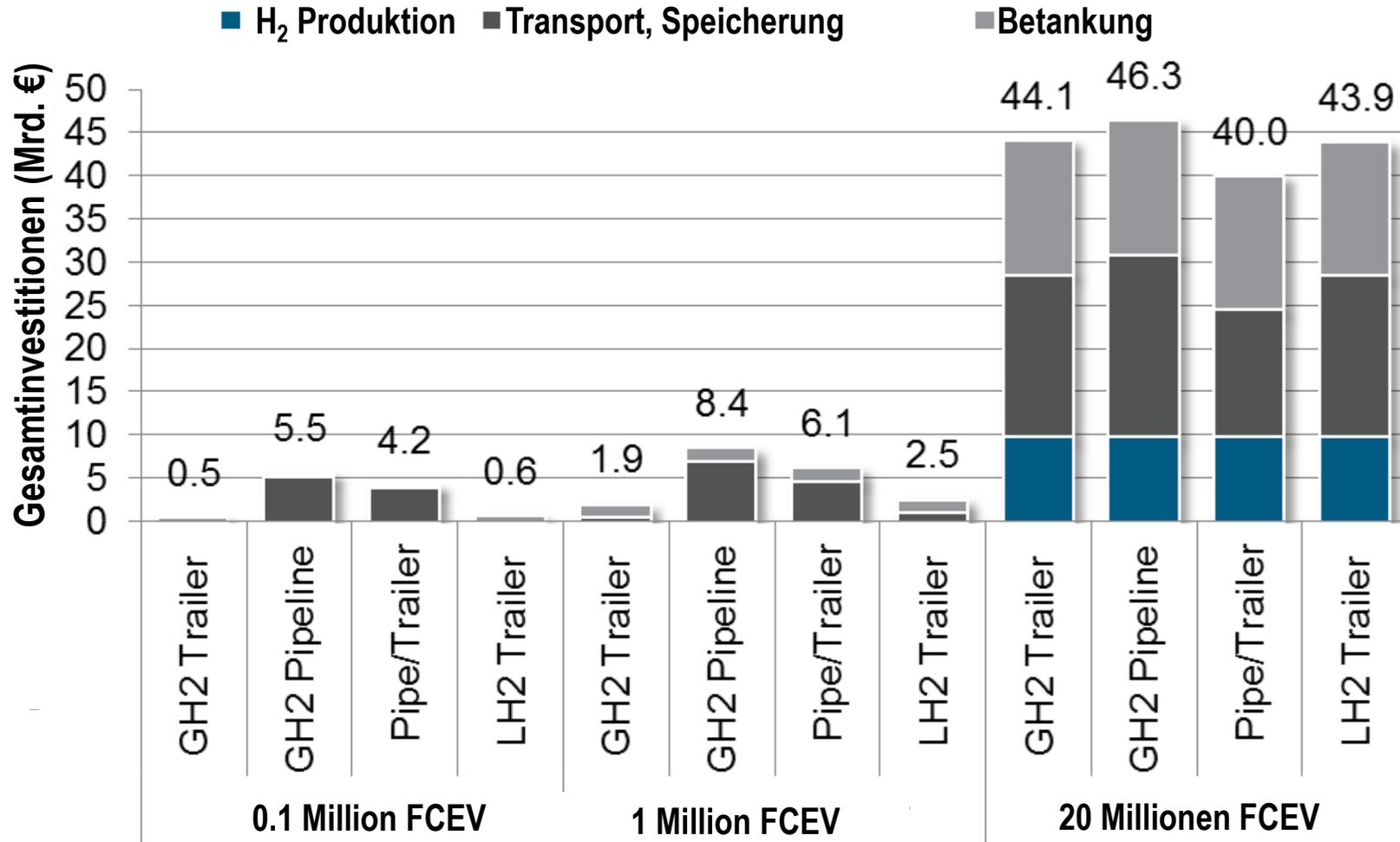
- Für die Markteinführung (0,1 Million Pkw) sind die Mobilitätskosten für die Ladeinfrastruktur deutlich geringer im Vergleich zum Wasserstoff
- Steigerung der spezifischen Kosten beim Wasserstoff zwischen 1 und 3 Millionen Pkw resultiert aus dem Übergang hin zu einer rein erneuerbaren Erzeugung des Wasserstoffs
- Mobilitätskosten für die volle Marktdurchdringung annähernd gleich; die geringere Effizienz des Wasserstoff-Pfades wird durch die niedriger Strombezugskosten ausgeglichen

Wasserstoff-Infrastruktur, Szenario „Pipeline Versorgung 20 Mio. Pkw“



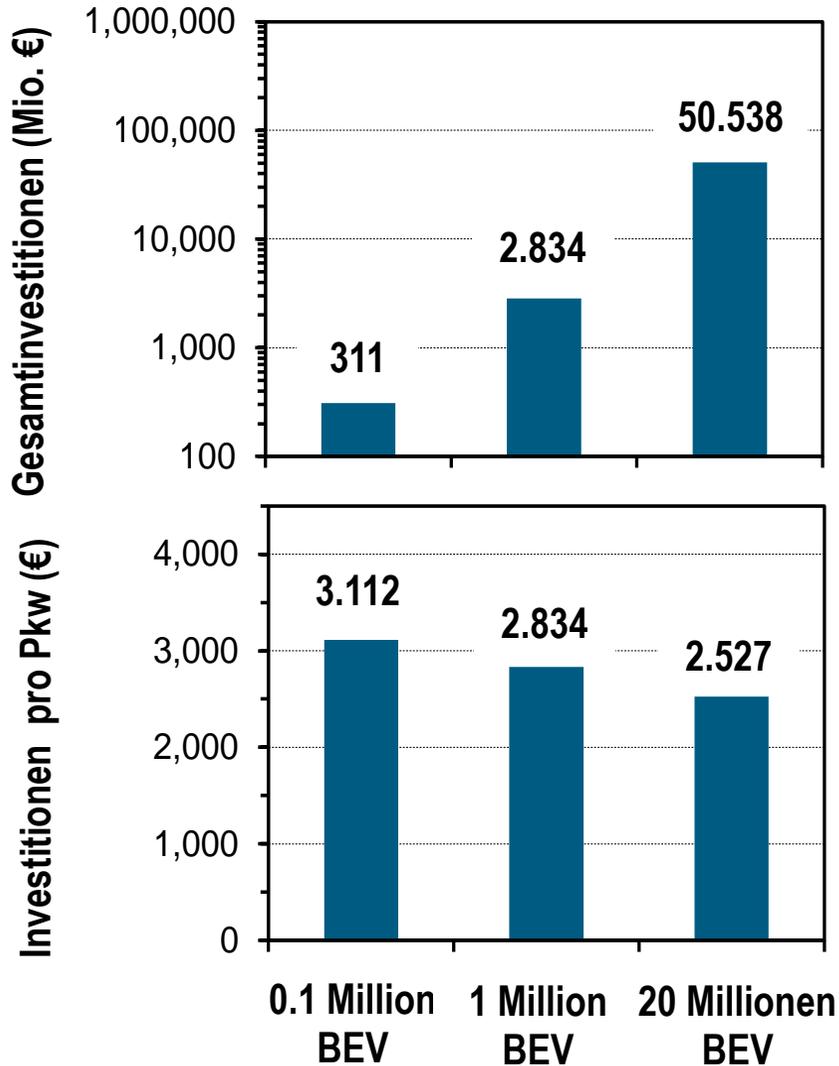
Gesamtinvestitionen für verschiedene Transportvarianten

Wasserstoff-Infrastruktur

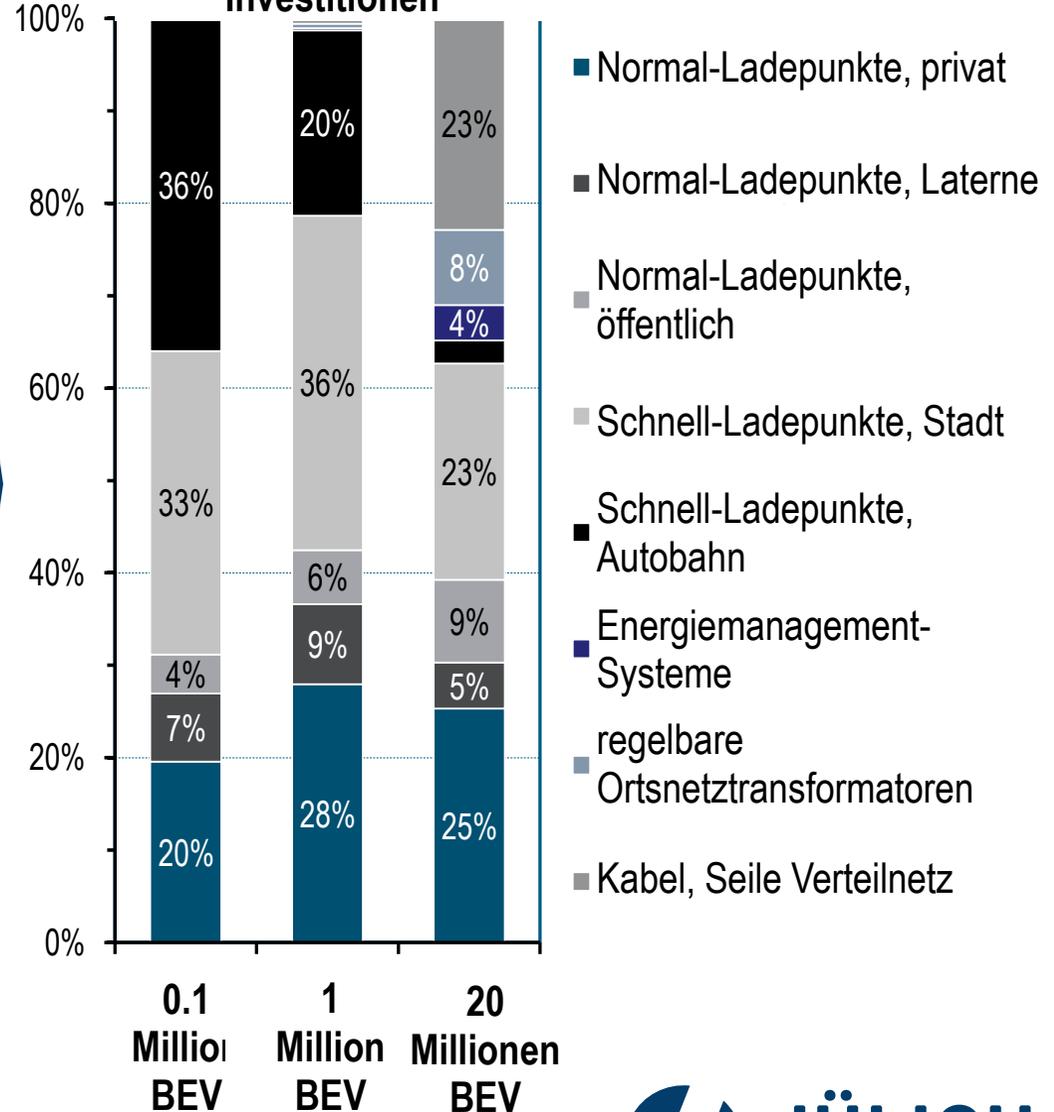


Gesamtinvestitionen

Elektrische Ladeinfrastruktur



Zusammensetzung der Investitionen



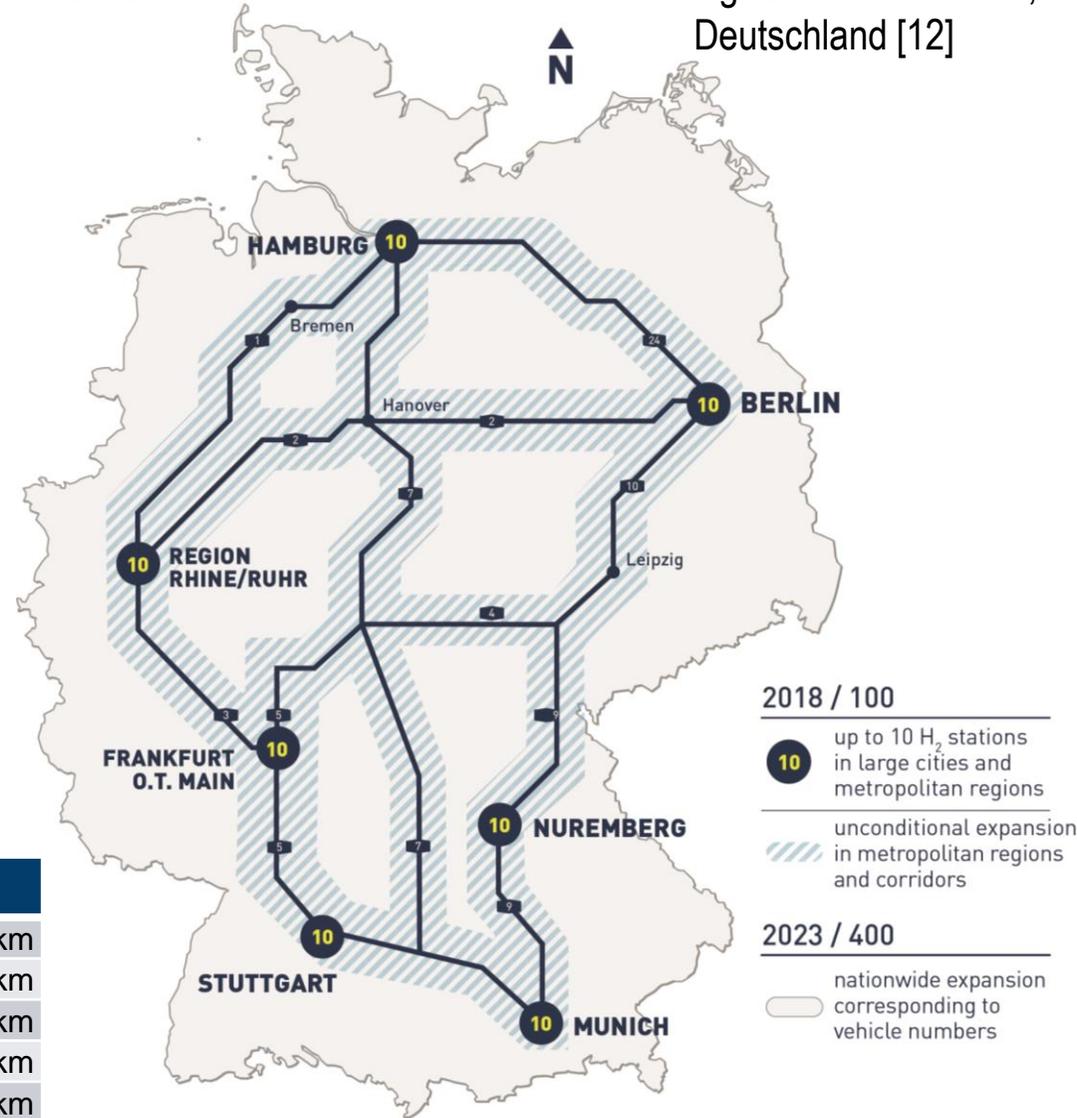
Derzeitiger Stand der Infrastruktur: Wasserstoff

- **Weltweit (Stand Mai 2017):**
 - ca. 2.500 Fahrzeuge in Betrieb
 - ca. 220 öffentliche Wasserstoff-Tankstellen verfügbar Ende 2016: Japan (44%), USA (17%), Germany (13%)
- **Deutschland:**
 - September 2018: 51 H₂-Tankstellen in Betrieb; weitere 48 in Planung oder Bau
 - Zielwert 2023: 400 Tankstellen
 - Wasserstoff-Pipeline-Systeme in Chemie/Industrie über Jahrzehnte sicher in Betrieb

Existierende Wasserstoff-Pipelines (Mai, 2017)	
USA	2.608 km
Europa	1.598 km
darunter Deutschland	340 km
Weitere Länder	337 km
Gesamt	4.542 km

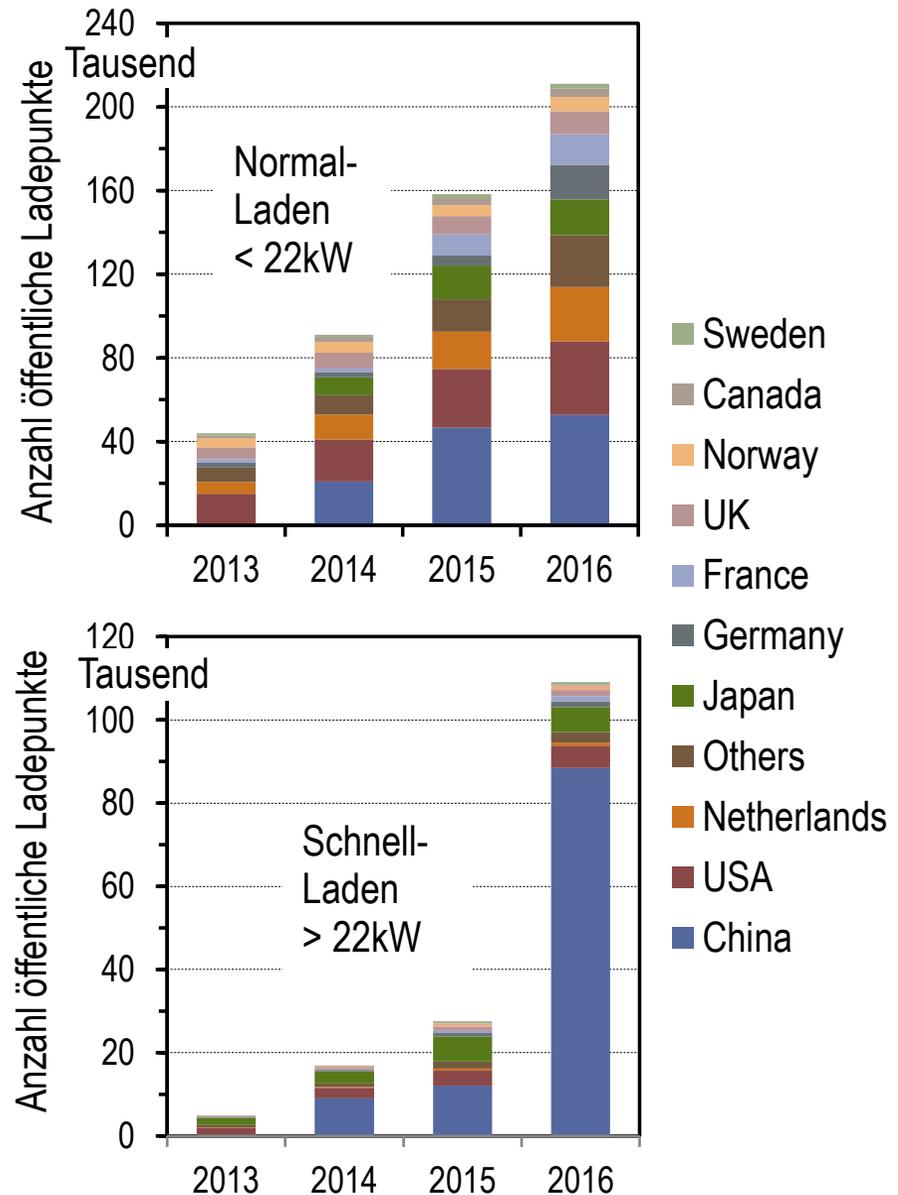
Quellen: [9], [10], [14], [15]

Planung Tankstellenaufbau, Deutschland [12]



Derzeitiger Stand: Elektrische Ladepunkte

- Ende 2016: Gesamtbestand an Batterie-elektrischen Fahrzeugen ca. 2 Millionen weltweit, hauptsächlich in China (32 %) und USA (28 %)
- Hohe Dynamik im Aufbau von Normal- und Schnell-Ladestationen
- Weltweit führend Ladeinfrastruktur 2016: China, USA und die Niederlande
- Schnell-Ladung (Leistung > 22kW): Höchste Dynamik und absolute Zahl der Ladestellen in China



Quelle: [16]